

开放架构下能源互联网新能源接入 功率控制方法研究

任光¹, 曹军威¹, 胡紫巍²

(1.清华大学信息技术研究院, 北京 100084; 2.全球能源互联网研究院, 北京 102219)

摘要:针对光伏新能源微网的功率平衡问题,提出了基于可变阶功率系数矩阵的功率控制实现方法。首先分析了微网运行时电源侧与终端负荷网络侧的功率变化特点,提出了功率系数矩阵。然后,基于功率系数矩阵,分析了终端负荷网络稳定、终端负荷网络变化和新能源输出功率时变三种情况下的矩阵变化情况。最后,选取一天中某一时间节点,采用迭代辨识与自适应控制方法实现了智能储能功率系数的优化辨识,在变阶切换的基础上实现了更为精确的功率调节。

关键词: 能源互联网; 微电网; 新能源; 光伏

The Control Method of the New Energy's Power Accession Under the Open Structure of Energy Internet

REN Guang¹, CAO Junwei¹, HU Zhiwei²

(1. Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: Aimed at the power balance issue of photovoltaics new energy micro grid, it puts forward an implementation approach for power control based on a variable order power coefficient matrix. Firstly, the power changing characteristics between the power supply and the load is analyzed when micro grid is running, and the variable order power coefficient matrix is proposed. And then, considering these situations of stable load, variable load and time-varying power of new energy, the matrix's change is analyzed based on the power coefficient matrix. Finally, by selecting a time point in a day, an iterative identification and adaptive control method implements the optimization identification of intelligent energy storage power coefficient, and further realizes the more accurate power control based on the variable order switching.

Key words: Energy internet; Micro grid; New energy; Photovoltaics

0 引言

能源互联网理论与技术在全球范围内快速传播,引领能源变革的发展方向^[1,2]。它把互联网技术与传统能源技术融合起来,使得能源具有双向流动、自主接入和交易自由、以及绿色低碳等特点,将为人们提供高效、共享、清洁和智慧的能源生产与消纳新方式,是能源领域的一次变革性发展。

能源互联微网是能源互联网的局域表现形式,也是新能源区域自治单元^[3]。在能源互联网架构下,它融合了能量路由技术、智能储能技术、新能源自

主接入技术和开放式交易平台、独立运营技术等,为工业生产和居民用能提供了智能和民主化的能源平台^[4,5]。不同于智能电网时代的微电网,它在商业模式和网络离网运行上具有独立性^[6,7]。

新能源直供模式是能源互联网的一种应用形态,也是能源互联微网示范工程的发展方向之一^[8]。光伏发电新能源重要组成部分,目前全球范围内正大规模推广建设光伏电站系统。现有的光伏发电系统一般接入大电网,通过原有电网传送到用户,即光伏发电系统没实现基于直供模式的局域组网^[9]。

功率分配是电力网络控制的一个基本功能,在一个已建成的电网中,功率分布取决于网络拓扑结构和参数^[10,11]。能源互联网架构下的微网功率分配

基金项目: 国家电网科技项目 (SGR1XTKJ[2015]253)。

Foundation item: Supported by the State Grid R&D Projects (SGR1XTKJ[2015]253).

呈现出新的特点,由于能源所有者可自主接入微网和交易自由,功率的供给方和消纳方会随时发生交易行为,微网面临大量的临时性功率调整任务。而且,由于微网独立运行,不能直接从外部高压电网获得功率,使得功率自然分布能力降低。这些特点正是探索直供模式下功率平衡性的新需求。

这项研究针对开放架构下的光伏直供模式的新能源微电网,深入研究了系统化的功率控制方法。首先,依托现代信息检测技术,提出了可变阶功率系数矩阵,它描述了微网稳态运行下的功率特征;然后,把可变阶功率系数矩阵应用到功率控制中,实现了微电网功率平衡;变阶行为以及储能功率的自动调节适应了开放性和自适应性要求,方便功率设备的自由接入。本文最后考虑新能源功率变化规律,以一天中某一时点的运行为对象,研究了基于迭代学习控制的功率控制方法,实现了光伏直供模式下的功率平衡。

1 新能源微网系统分析

1.1 微网结构

考虑如下图1所示架构的分布式光伏新能源微网。

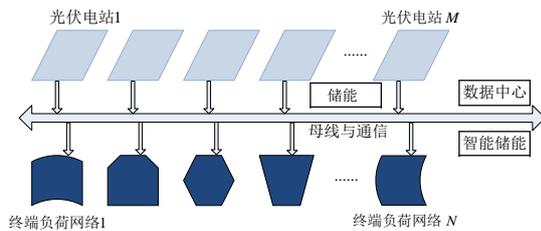


图1 新能源微网系统

图1给出的光伏直供模式微网系统具有如下特征:

- 1) 能源微网包含 M 路光伏发电子系统,发电功率不一致;终端负荷网络侧由 N 路不同终端负荷网络组成,其表现形式可以是一栋楼,一所小学或一个工厂等。同样,每一路负荷网络的功率不一致;
- 2) 微网控制系统包含信息检测系统,可对所有接入系统的光伏电站和终端负荷网络进行实时功率测量;
- 3) 该微网本质上是一类光伏直供应供模式;
- 4)

储能包括两个,一个是智能储能,用于调整微网功率平衡;另一个是与用存储能量,可在光伏电站不工作的夜间使用。

对于上述架构特征的新能源微网系统,需要建立高效稳定的潮流控制机理,在各光伏组件功率不一致且时变的条件下,对接入数量不稳定的负载进行有效电能供给,实现网内功率平衡。

1.2 信息系统与潮流分析

考虑图1所示能源微网,其具有如下重要特征。

第一,由于新能源电源功率时变,且负载接入数量和功率可变,使得潮流控制对象多变,不确定性大。因此,受控对象本质上是一种时变不确定系统。

第二,微网中智能检测装置与数据库的引入,在物理上体现了信息与能源结合的互联特点。这表明,该能源微网同时是一类信息物理系统。

第三,微网运行时,除了表现出传统电力系统运行特征外,还需要用到智能检测技术、光纤或无线通信技术、大数据技术及现代智能控制理论。因此,潮流控制需要融合这些技术手段,以求在精确性、实时性和稳定性等方面达到良好的性能。

1.3 微网组网结构的必要性与合理性

该微网结构实质上是一种光伏新能源的直供模式。它可以实现基于新能源的本地消纳和区域自治,避免使用火电等高排放电源,这符合发展清洁能源的趋势,有探索的必要性。

这类微网结构在技术上具有可行性。正常状态下,在微网范围内,所有负荷都不需要外部电能,完全依赖光伏发电和储能。白天光伏发电直接供给微网内负荷,并把过剩的能量存储到智能储能设备中;夜晚的电能需要来自于储能的释放。在故障状态下,该微网可以接入外部电网,从外部临时补充电能。

同时,在经济上也具有一定的合理性。这类微网在检测单元和储能设备上会增加较多投资。两个措施有利于提高经济性。第一个是把光伏电站的单体规模适当提高,并把负载实现终端网络化,不微

网只有一个接口, 这样只需要一个测量单元。从而大量减少测量单元数量。第二个措施是这类微网更适合推广应用到白天电能需求大, 而晚间电量需求相对较少的情况, 以减少储能的容量需求。比如白天能耗大的工业园区或商业集中连片区。

1.4 变阶功率系数矩阵的提出

1) 电力供应侧

光伏组件输出功率函数:

$$P_i(t) = \mathcal{G}_i(t)A_i \quad (1)$$

其中, $P_i(t)$ 是实时功率; $\mathcal{G}_i(t)$ 是功率系数, 为时变量; i 是光伏组件编号; A_i 是已知额定功率。

光伏组件构成电力供应侧, 供应总功率即各组件的功率之和。为了便于获取和管理各光伏组件的功率实时变化, 可建立供应侧功率系数矩阵如下:

$$\mathcal{G}(t) = [\mathcal{G}_1(t), \mathcal{G}_2(t), \dots, \mathcal{G}_M(t)], i = M \quad (2)$$

其中, M 表示微网内光伏组件数量。相应的, 供应侧总功率可表示为:

$$P(t) = \sum_{i=1}^M P_i(t) \quad (3)$$

结合式(1)和(2), 可得:

$$P(t) = \mathcal{G}(t)A \quad (4)$$

其中,

$$A = [A_1, A_2, \dots, A_M]^T, i = M \quad (5)$$

功率系数矩阵的一个重要特点是可以变阶, 即当光伏组件停止工作或增加光伏组件时, 系统可自动改变矩阵 i 值, 从而完整地获得功率组件接入信息。

2) 负载侧

对于负载侧, 功率消耗时, 负载功率函数为:

$$P_i^*(t) = \beta_i(t)B_i \quad (6)$$

其中, $P_i^*(t)$ 是实时消耗功率; $\beta_i(t)$ 是功率系数, 为时变量; i 是负载编号; B_i 是已知负载额定功率。

负载侧功率系数矩阵为:

$$\beta(t) = [\beta_1(t), \beta_2(t), \dots, \beta_N(t)], i = N \quad (7)$$

相应的, 负载侧总消耗功率可表示为:

$$P^*(t) = \beta(t)B \quad (8)$$

其中,

$$B = [B_1, B_2, \dots, B_N]^T, i = N \quad (9)$$

同样, 负载侧功率系数矩阵 B 也可变阶, 即负载可离网或新加入微网。

2 基于变阶功率矩阵的潮流控制

2.1 功率系数矩阵检测

为了实现微网的功率平衡, 需要已知发电侧和负载侧的功率状况。对于负载侧, 由于设备都有标明额定功率, 只需检测是否接入电网即可。而对于发电侧, 则需要依据负载功率来确定光伏组件接入电网还是接入存储系统。而且, 由于光照条件的变化, 个体光伏组件的输出功率也是变化的, 这需要实时的功率检测, 确定发电侧功率系数矩阵。

功率系数检测中, 需要获得数据如下:

1) 发电侧光伏组件数量, 每一路光伏组件的即时输出功率以及功率系数矩阵分量。2) 负载侧接入数量以及额定功率数值, 功率系数在正常状态下一一般为 1。

2.2 微网功率平衡分析

1) 负载稳定情形

对于图 1 所示微网, 发电侧的光伏组件存在一个规划好的上限数量, 设为 ψ 。对于 N 路负载, 一旦确定总消耗功率, 即可相应获得 M 的取值, 且 $0 \leq M \leq \psi$ 。对于 $\psi - M$ 路光伏组件, 电能将直接存入储能设备。

为了增强功率平衡性, 另一路智能储能需具有调节功能。即当 M 确定后, 发电侧输出功率会略高于负载侧消耗功率。这时, 可调节储能装置的储能功率, 使得功率消纳完全匹配于母线上的传输功率。此时:

$$P(t) = P^*(t) \quad (10)$$

2) 负载变化情形

当负载数量发生改变时, 比如, 增加一个负载。那么, 需要依据增加负载的额定功率和发电侧光伏组件功率的数值对比, 确定增加接入母线的光伏组

件数量 J ，同时减少相应的接入储能数量，实现功率平衡调整。

同样，当接入母线的光伏组件为 $M + J$ 时，发电侧输出功率也会略高于负载侧消耗功率，需要对智能储能进行调节，增强功率平衡性。

3) 光伏组件输出功率时变情形

光伏发电功率不稳定时，如随着光照强度的改变而发生变化，而负载侧的功率消纳不会随之改变。此时，需要重新调整接入母线的光伏组件数量。

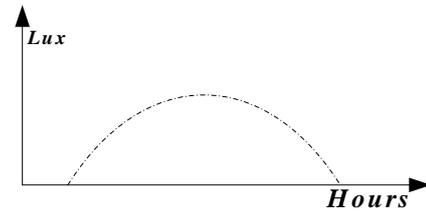
当检测到光伏发电功率下降时，功率系数矩阵取值随之调整。反馈到控制系统，依据功率平衡的要求，增加接入母线的光伏组件数量。相应地，减少接入储能的光伏电站数量，并且，智能储能也微调功率。当检测到光伏发电功率上升时，功率系数矩阵值随之调整。控制系统调整后，接入母线的光伏电站数量减少，增加接入储能的光伏电站，并且智能储能相应微调。

总体而言，依据功率平衡性，控制系统执行两步调整。第一步调整光伏电站接入母线数量和接入储能数量，实现粗调；第二步调节智能储能功率，实现精确的微调。

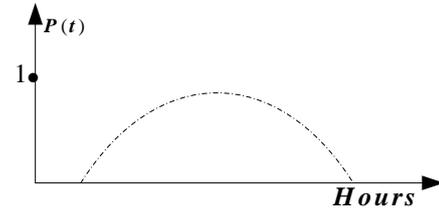
3 微网结构稳定下的潮流控制

3.1 微网结构稳定下的功率特点

采用基于功率系数矩阵的检测与控制方法，可以初步实现功率平衡。但是，当光伏组件的个体输出功率与负载侧的总额定功率无法完全一致匹配时，即电源点输出功率时变条件下，需要对智能储能进行精确的功率控制，这对负载稳定运行和节省能量都很有意义。光伏组件通常工作在有光照条件的白天，且随着光照强度的变化，一天之中呈现有规律的变化。下图 2 给出了光照强度变化参考规律和功率系数的变化规律。



(a) 光照强度分布示意



(b) 输出功率示意

图 2 光照强度变化参考规律和功率系数变化规律

对于图 2 所示规律，图 3 给出了接入母线的光伏组件数量参考变化规律。可见，光照越强，接入数量越少；光照越弱，接入数量越多。

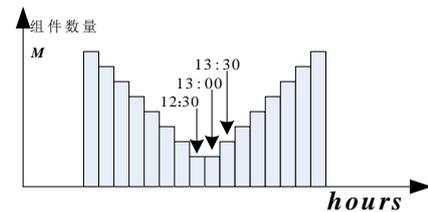


图 3 接入母线光伏组件数量参考变化规律

接入母线的光伏组件数量可以通过计算功率系数数值的匹配性来确定，对于控制系统及算法而言，这易于实现。在确定接入光伏组件数量之后，需要对储能功率进行精确控制，这一问题则具有时变性和复杂性。

考虑某一时间点 t_1 ，在该时刻接入母线的光伏组件数量为 M ，输出功率与负载总额定功率的差值为：

$$P_e(t_1) = P(t_1) - P^* \quad (10)$$

智能储能可视为一路特殊负载，令其功率系数为 $\beta_s(t_1)$ ，因此可有下式：

$$P_s^*(t_1) = \beta_s(t_1)B_s \quad (11)$$

其中， $P_s^*(t_1)$ 是储能实时功率， B_s 是储能额

定功率。当 $P_s^*(t_1) = P_e(t_1)$ 时, 微网功率达到精确平衡, 此时, 储能功率系数为 $\beta_s(t_1)$ 。

对于光伏供电模式, 微网系统以 24 小时为间隔重复运行, 且只在有光照条件的白天运行。对于结构稳定的微网, 接入母线的光伏组件数量已经确定, 而每天在 t_1 时刻检测到的输出功率 $P(t)$ 不完全一致。因此, 导致 $P_e(t_1)$ 不一致, 进一步导致每次获得的 $\beta_s(t_1)$ 都不完全相同。由公式(11)可知, $P_s^*(t_1)$ 也会每天都不相同。为了获得 t_1 时刻稳定的储能功率, 需要获得最优的 $\beta_s(t_1)$ 值, 以便在较长的时间里, 使得微网功率平衡性最佳, 改写成离散形式, 即有下式成立:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P_s^*(n) - P_e(n) = 0 \quad (12)$$

3.2 功率系数辨识与自适应控制

把公式(10)、(11)改写为离散形式, 并设计智能储能功率控制系统如下:

误差方程:

$$\begin{cases} P_e(n) = P(n) - P^* \\ e_p(n) = P_e(n) - P_e(n-1) \end{cases} \quad (13)$$

功率系数辨识律:

$$\beta_s(n) = \beta_s(n-1) + \rho e_p(n) \beta_s(n-1) / B_s \quad (14)$$

自适应律:

$$\begin{cases} P_s^*(n) = \beta_s(n) B_s \\ D(n) \leftrightarrow P_s^*(n) \end{cases} \quad (15)$$

式(14)中, ρ 是加权系数, 该式为一阶迭代辨识。式(15)中, $D(n)$ 是潮流调节指令, 由 $P_s^*(n)$ 等价生成。对于式(13)、(14)和(15)组成的系统, 有如下性质:

性质 1. 对于在 t_1 时刻的一系列采样功率 $P(n)$, 必有一个稳态均值, 采样功率值围绕该时刻稳态均值波动, 且有下式成立:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \beta_s(n+1) = \beta_s^* \quad (16)$$

此时, $\lim_{n \rightarrow \infty} P_s^*(n) = P_e(n)$ 。其中, β_s^* 是功率系数的真值。

3.3 问题探讨

1) 如何确定变阶规律

变阶矩阵的确定是潮流控制的第一步, 实现功率粗调。依据发电侧和负载侧的功率系数矩阵, 可确定接入母线的光伏组件数量。而系数矩阵是可变阶的时变矩阵, 对于不同的潮流控制方法, 可依托智能检测技术, 实现不同的变阶规律。

当各光伏组件输出功率相同时, 可采用“冗余变阶”或“欠变阶”。相应地, $P_e(n) > C$ 或 $P_e(n) < 0$, 且 $P_e(n)$ 小于任意一路光伏组件输出功率。此时, 只要调节智能储能的功率即可实现精确的潮流控制。

当各光伏组件输出功率不完全相同时, 可采用“功率组合”方法, 适当调节智能储能的目标功率。

2) 功率调节指令的生成

公式(15)中的潮流调节指令 $D(n)$ 由储能实时功率指标 $P_s^*(n)$ 等价生成, 生成算法严格保障 $P_s^*(n) = \beta_s(n) B_s$ 即可。

4 仿真分析

4.1 智能储能目标功率

对于确定的接入负荷, 需要确定供应侧的光伏组件数量, 而组件的功率等级决定了不能任意随时地改变接入数量。因此, 对于光伏组件功率在较小时间段内的变化, 需由智能储能自动功率调节, 确保功率平衡。

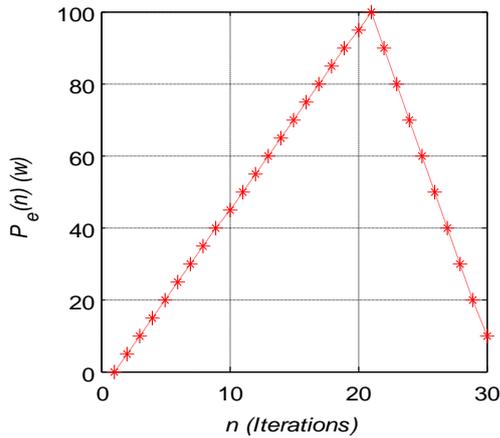
对公式(13)、(14)、(15)组成的系统进行仿真, 设置如表 1 所示:

表 1 参数设置

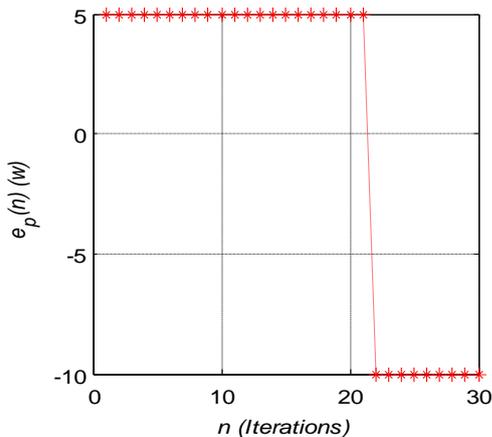
$P_e(0)$	P^*	$\beta_s(1)$	ρ	B_s
5w	1000w	0.5	0.9	500w

图 4 给出了测量化情形下的储能功率化情况。图 4(a)给出了接入光伏电站与负荷功率的差值化测量值, 仿真环境下给出了每次 5W 的化

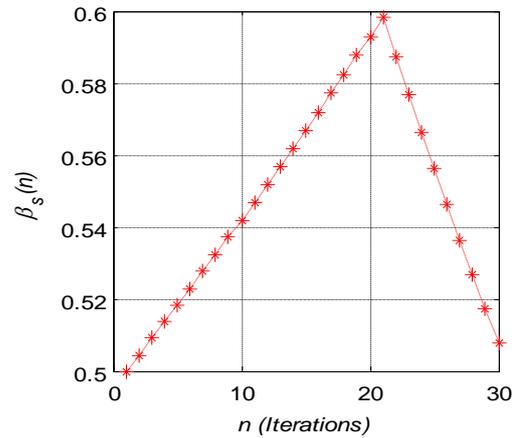
情形。4(b)给出了迭代误差，曲线显示为 5W。4(c)给出了智能储能功率系数的变化情形，其初始值是 0.5，随着光伏功率的上升，逐步调整到 0.6，以确保负荷功率平衡。然后，随着光伏功率的下降，逐步调整到 0.51 左右。4(d)显示，对于额定功率为 500W 的储能装置，其实际功率一直在变化，且在 250W 到 300W 之间。



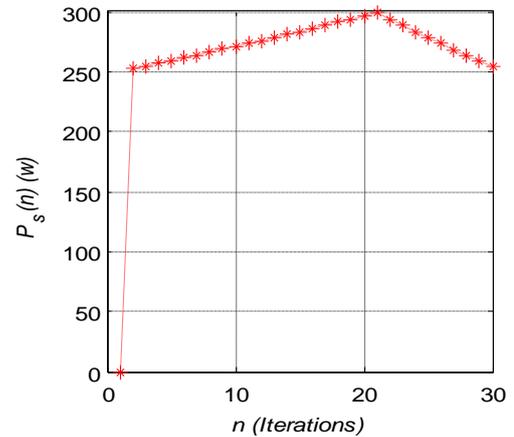
(a) 测量差值



(b) 迭代误差值



(c) 储能系数



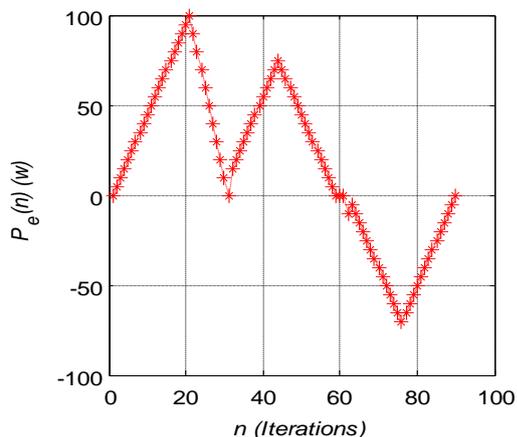
(d) 储能功率

图4 智能储能变化规律

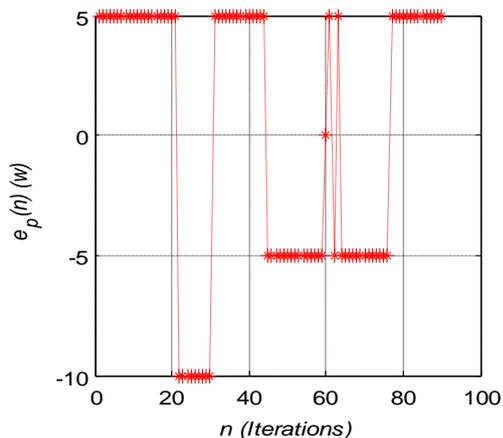
在图4中,4(a)给出了接入光伏组件与负荷功率的差值变化测量值,仿真环境下给出了每次5W的变化情形。4(b)给出了迭代误差,曲线显示为5W。4(c)给出了智能储能功率系数的变化情形,其初始值是0.5,随着光伏功率的上升,逐步调整到0.6,以确保负荷功率平衡。然后,随着光伏功率的下降,逐步调整到0.51左右。4(d)显示,对于额定功率为500W的储能装置,其实际功率一直在变化,且在250W到300W之间。

4.2 变阶条件下的智能储能调节

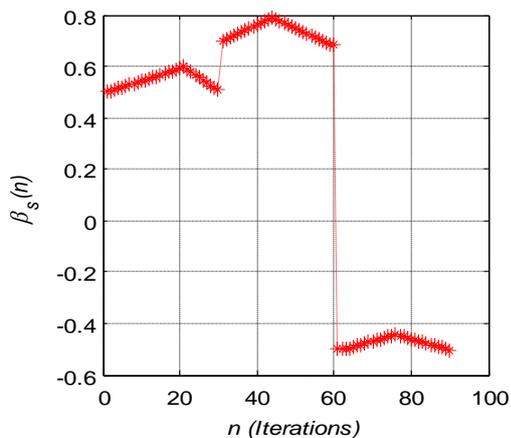
当负荷发生突变,较大幅度地增加或减少功率需求时,功率系数矩阵(2)和(7)都会发生变阶。仿真过程分析了阶数增加和减少两种情况,如下图5所示。



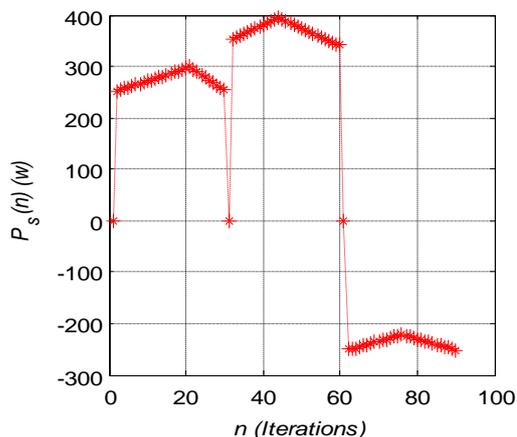
(a)变阶后的测量差值



(b)迭代误差值



(c)变阶后的功率系数



(d)储能功率

图 5 两次变阶后的智能储能变化规律

图 5 给出的变阶行为发生了两次, 第一次变阶发生在第 30 次运行时, 是一类“冗余变阶”。可以看出, 在第 31 次到 60 次运行时, 储能功率系数发生了增大变化, 大约在 0.65 到 0.8 之间; 相应的储能功率在 350W 到 400W 之间。第二次变阶发生在第 61 次运行时, 是一类“欠变阶”。随即在第 61 次到 90 次运行时, 储能功率系数发生了反转, 转而向负荷输电。此时, 功率系数在 -0.5 到 -0.45 之间, 相应的输出功率在 250W 到 220W 之间。

变阶行为以及储能功率的自动调节适应了该能源微网开放性和自适应性要求, 方便功率设备的自由接入。

5 结论

针对光伏组件构成了能源微网系统, 深入研究了基于信息与能源融合的潮流控制方法。通过引入可变阶功率系数矩阵, 采用智能检测和学习控制方法, 分粗调和微调两步实现了微网内部的潮流控制。基于可变阶功率系数矩阵的潮流实现方法, 易于引入各类智能控制策略, 提升潮流智能化水平

参考文献

- [1] 杰里米·里夫金 第三次工业革命[M]. 张体伟, 孙毅宁, 译. 中信出版社, 2012.
- [2] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J], 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
- [3] 周海明, 刘广一, 刘超群. 能源互联网技术框架研究[J]. 中国电力,

- 国家电网报, 2014, 47(11): 140-144.
- [4] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光, 等. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.
- [5] 查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 702-713.
- [6] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
- [7] 陈健, 王成山, 赵波, 等. 考虑储能系统特性的独立微电网系统经济运行优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 25-31.
- [8] 于慎航, 孙莹, 牛晓娜, 等. 基于分布式可再生能源发电的能源互联网系统[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 104-108.
- [9] 沈沉, 吴翔宇, 王志文, 等. 微电网实践与发展思考, 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 1-11.
- [10] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
- [11] 吴雄, 王秀丽, 刘巧民, 等. 微电网能量管理系统研究综述[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 7-14.

收稿日期: 2016-05-29

作者简介:

任光(1979), 男, 助理研究员, 博士后, 研究方向为能源互联网理论与能源路由器, renguang@tsinghua.edu.cn;

曹军威(1973), 男, 研究员, 博士, 从事智能电网、能源互联网理论与技术研究工作;

胡紫巍(1985), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力通讯和能源互联网。